

<Review>

남극 블루아이스를 활용한 고기후 연구

허순도^{1,*} · 안진호²

¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지고환경연구부

²서울대학교 지구환경과학부

요 약

남극 빙원에서 오랜 기간 삭박에 의해 형성된 블루아이스 지역에는 수 십 만년에서 백 만년 이상된 얼음이 표면에 노출되어 있다. 따라서, 많은 비용과 시간이 소요되는 심부빙하시추와는 달리, 적은 비용과 짧은 시간에 오래된 얼음 시료를 블루아이스 지역에서 확보하여 고기후 연구에 활용할 수 있다. 블루아이스 시료를 고기후 연구에 적용하기 위해서는 얼음 시료에 대한 정확한 연대측정이 선행되어야 하기 때문에, 다양한 연대측정 시도 되고 있다. 최근에, 한국과학자에 의해서 남극 장보고과학기지 주변의 엘리펀트 모레인 블루아이스 지역의 운석탐사가 집중적으로 수행되었으며, 이 지역에서 오래된 얼음 획득을 위한 예비 연구가 수행되었다. 향후 운석, 지질, 지구물리, 빙하, 대기 등의 종합적인 연구를 통해 블루아이스의 생성과 거동을 더 잘 이해하고, 정확한 연령을 가지고 고기후 연구수행이 가능할 것으로 전망된다.

주요어: 남극, 블루아이스, 오래된 얼음, 고기후, 연대측정

Soon Do Hur and Jinho Ahn, 2017, Paleoclimate study using blue ice in Antarctica. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 4, p. 597-608

ABSTRACT: In the area of blue ice, formed by long-term erosion in the Antarctic ice field, hundreds of thousands to over a million years old ice is exposed on the surface. Consequently, we can obtain old ice samples at the blue ice area with cheaper expenses and shorter time than we drill a deep ice core, which requires large expenses and long time. Because accurate age dating is demanded in advance for utilizing blue ice for paleoclimate research, various dating methods have been tried. Recently, led by Korean scientists, meteorite exploration has been intensively carried out in Elephant Moraine blue ice field near the Jangbogo station in Antarctica, as well as preliminary research for the old ice recovery in that area. It is anticipated that future overall studies of meteorite, geology, geophysics, glaciers, and atmosphere will enable us to better understand the formation and behavior of the blue ice, and use the ice in paleoclimate research with accurate age.

Key words: Antarctica, blue ice, oldest ice, paleoclimate, age dating

(Soon Do Hur, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea; Jinho Ahn, Seoul National University School of Earth and Environmental Science, Seoul 08826, Republic of Korea)

1. 서 론

지구상에서 가장 추운 곳인 남극은 연중 영하의 기온이기 때문에 여름철에도 눈이 녹지 않고 그대로 보존되며 내린 눈은 계속 쌓여 두꺼운 눈층을 형성하고 그 하층에 의해 70~100 m 깊이에서 얼음으로 변하게 된다. 이렇게 형성된 얼음에는 강설 당시의

공기가 기포 형태로 그대로 보존되고 있어 과거의 대기 조성을 알 수 있다. 또한 얼음에서 다양한 성분을 분석하여 과거의 대기환경을 알 수 있기 때문에 지구 대기환경 변화의 '냉동타임캡슐'로 알려져 있다(Boutron, 1995; Petit *et al.*, 1999; Jouzel, 2013).

지금까지 남극에서는 고기후 연구 수행에 적합한 얼음 시료를 얻기 위해 수십 m에서 수천 m에 이르

* Corresponding author: +82-32-760-5461, E-mail: sdhur@kopri.re.kr

는 다양한 빙하시추가 이루어졌으며 이를 통해 계절 단위에서 년 단위의 고해상도 연구와 더불어 최대 84만년까지의 기후변화 복원이 이루어진 장주기 기후 변화 연구가 이루어졌다(Petit *et al.*, 1999; Watanabe *et al.*, 2003; EPICA community member, 2006). 이러한 빙하시추는 극한 환경에서 이루어지기 때문에 로지스틱 지원과 기술 운영에 있어서 많은 어려움이 있으며, 특히 수십만 년 이상 된 얼음 시료를 얻기 위한 수천m 깊이의 심부빙하시추는 고난이도의 기술력이 필요하며 많은 비용과 시간이 소요된다. 이러한 문제점을 극복하고 비교적 손쉽게 오래된 얼음을 얻을 수 있는 방법이 블루아이스를 활용하는 것이다. 블루아이스는 특별한 환경에서 오랜 기간의 삭박에 의해 심부의 얼음이 노출되어 빛의 투과와 산란에 의해 푸른색을 띠는 얼음 층으로, 오래된 얼음이 표면에 노출되어 있기 때문에 손쉽게 오래된 얼음 시료를 얻을 수 있다(Popp *et al.*, 2004; Custer, 2006; Moore *et al.*, 2006; Sinisalo *et al.*, 2007). 또한 심부 빙하시추에 비해 훨씬 간단한 천부 빙하시추를 통해 일련의 시료를 획득 할 수 있다(Moore *et al.*, 2006; Sinisalo *et al.*, 2007).

남극에서 최초의 블루아이스에 대한 기록은 1945~1952년에 이루어진 노르웨이-영국-스웨덴 남극 공동 탐사대의 보고서에서 확인되며(Giaever, 1954), 이 탐사에서 확인된 내용은 Schytt (1961)에 의해 자세히 보고되었다. Crary and Wilson (1961)은 블루아이스의 표면 특성을 자세히 기술하고 활강풍(katabatic wind)에 의해 쌓여있던 눈이 제거되어 형성되었다는 생성 기작에 대해 설명하였다.

남극에서 블루아이스가 주목 받은 것은 블루아이스 지역에서 다량의 운석이 발견되기 시작하면서이다(Cassidy *et al.*, 1977; Whillans and Cassidy, 1983; Nishiizumi *et al.*, 1989). 남극 야마토 산맥 블루아이스에서 최초의 남극 운석이 발견된 이후(Yoshida *et al.*, 1971) 현재까지 남극 블루아이스 지역에서 6만여 개의 운석이 발견되었다. 그 후 블루아이스에서 운석이 많이 발견되는 이유를 설명하기 위해 빙상의 유동에 대한 연구가 이루어지고 이를 설명할 수 있는 적절한 빙상 유동 모델이 제시되었다(Naruse and Hashimoto, 1982; Whillans and Cassidy, 1983; Azuma *et al.*, 1985). 이러한 일련의 연구들은 블루아이스에 대한 이해를 넓히게 되었고 이를 바탕으로

블루아이스를 활용한 고기후 복원연구 가능성이 제시되었다(Bintanja, 1999; Custer, 2006; Moore *et al.*, 2006; Sinisalo *et al.*, 2007).

최근에 빙하코어 연구자들의 최대 관심사 중의 하나인 남극에서 백만 년 이상 된 오래된 얼음 시료를 획득하여 백만 년 이전의 대기환경을 복원하기 위한 연구가 적극 추진되면서, 많은 비용과 시간이 소요되는 심부 빙하시추 이외에 상대적으로 간단한 블루아이스에서 오래된 얼음 시료를 획득 할 수 있는 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다(Fisher *et al.*, 2013).

블루아이스를 활용한 고기후 복원연구에서 최대의 난제는 연대측정이다. 블루아이스는 긴 이동 경로와 오랜 시간의 삭박에 의해 많은 변형을 있었으며 조성도 변성되어 있을 가능성이 높다. 또한 얼음 자체를 이용한 정확한 연대측정에 많은 기술적 난제가 있어 고기후 연구에 적용하기에는 어려움이 있었다. 그러나 최근에는 분석기술의 발달과 과학자들의 관심이 증가하면서, 적은 양의 시료로 보다 더 정확하게 분석할 수 있는 분석기술들이 개발되어 블루아이스의 연대측정에 대한 여러 방법들이 제시되고 있다. 본 논평에서는 블루아이스의 생성 과정과 특성을 고찰하고 현재까지 검토된 연대측정법을 정리하였으며 향후 남극 블루아이스를 대상으로 한 고기후 연구 가능성을 제시하고자 한다.

2. 블루아이스 특성

2.1 블루아이스의 정의

Bintanja (1999)는 블루아이스를 표면 물질균형(mass balance)이 음의 값을 가지며, 삭박 과정이 승화에 의해 이루어지고 알베도가 눈으로 덮인 곳에 비해 낮은 지역으로 정의하였다. 이 정의에 의하면 해안가에서 여름철의 높은 온도에 의해 표면이 녹아 하부의 얼음 층이 노출되는 지역은 제외된다.

이름에서 알 수 있듯이 블루아이스는 파란색을 띠고 있고, 특히 주변의 눈으로 덮인 흰색의 빙원 지역과 대조되어 식별이 가능하다(그림 1). 블루아이스가 파란색으로 보이는 것은 태양광의 스펙트럼 중 적색 부분은 대부분 흡수되고 깊이 침투되는 청색 부분이 반사되기 때문이다(Winther, 2001), 단단하고 두꺼운 얼음 층이 파란색으로 보인다. 실제로 블루

아이스의 파란색은 얼음에 포함된 기포에서 균일한 산란이 일어나기 때문에 짙은 파란색 보다는 밝은 파란색으로 보인다. 블루아이스의 얼음 내에는 많은 공기 방울이 있기 때문에 단단한 얼음의 밀도 (917 kg m^{-3}) 보다 낮은 밀도(850 kg m^{-3})를 갖는 것으로 알려져 있다(Weller, 1968; Mellor and Swithinbank, 1989; Bintanja and Van den Broeke, 1995a).

2.2 블루아이스의 분포

블루아이스의 규모는 수십 km^2 에서 수천 km^2 에 이르기까지 다양하며, 전체 남극대륙의 약 1%를 차지하는 것으로 알려져 있으며(Bintanja, 1999; Winther *et al.*, 2001), 최근의 인공위성 자료를 이용한 자세한 분석에 따르면 $234,549 \text{ km}^2$ 로 남극대륙의 1.67%를 차지한다고 한다(Hui *et al.*, 2014). 블루아이스는 주로 높은 산악지대와 누나탁(Nunatak) 부근에 분포하며, 평균풍속이 높은 지역에 분포한다(Van den Broeke and Bintanja 1995). 이런 분포 특성은 다음에서 논의할 블루아이스의 생성 기작과 깊은 관련이 있다.

현재까지 많은 연구가 이루어진 블루아이스 지역은 대표적인 운석 산지로서 야마토 산맥(Yamato Mountains; Naruse and Hashimoto, 1982; Azuma *et al.*, 1985; Moore *et al.*, 2006), 알란 힐(Allan Hills; Schultz *et al.*, 1990; Faure and Buchanan, 1991), 마운트 모울톤(Mount Moulton; Wilch *et al.*, 1999; Dunbar *et al.*, 2008), 드론닝 모우드 랜드(Dronning Maud Land) 헤이메프르트젤야(Heimefrontfjella) 산맥(Bintanja, 1999; Sinisalo *et al.*, 2007) 과 빅토리아랜드의 프론티어 산(Frontier Mountains; Folco *et al.*, 2006) 등이다(그림 2).



Fig. 1. A photo of the blue ice area in Tarn Flat, Victoria Land, Antarctica.

블루아이스 지대에서는 계속되는 삭박에 따라 하부의 얼음이 계속 상승하여 결국에는 오래된 얼음 층이 표면에 노출되게 된다. 대부분의 대규모 블루아이스들이 산출되는 지역들은 산악지대에 위치하여 빙상 하부 지형이 복잡하고 주변에 누나탁 등이 있어 얼음 층의 흐름이 매우 복잡하다(Grinsted *et al.*, 2003; Moore *et al.*, 2006).

2.3 블루아이스 지역의 대기 환경

블루아이스가 만들어지고 계속 유지하게 되는 특수한 기상 조건은 주변의 산악구조에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다(Bintanja and Van den Broeke, 1995a, 1995b). Bintanja and Reijmer (2001)에 따르면, 블루아이스 지역의 기상 조건은 주변의 눈으로 덮인 빙원지역과는 1) 얼음이 노출된 블루아이스의 표면과 눈으로 덮인 빙원 표면의 차이에 의한 알베도, 태양 복사의 소광 특성, 표면 거칠기 등의 표면 특성 2) 지형학적 또는 주변의 기하학적 환경 차이에 따라 서로 다른 기상환경을 보인다고 한다. 블루아이스 지역 상부의 공기는 눈으로 덮인 지역에 비해 공기는 더 따뜻하고 상대 습도는 더 낮아 훨씬 더 많은 승화를 일으키는 기상조건을 만들게 되어 블루아이스 형성에 크게 기여한다(Bintanja and Reijmer, 2001). 블루아이스 지역의 풍속은 눈으로 덮인 지역에 비해 순간 풍속이 훨씬 빨라 블루아이스 형성에 유리하지만, 연 평균 풍속으로 비교하면 비슷하다고 한다(Bintanja, 1999).

2.4 표면 특성

블루아이스 표면은 일반적으로 리플구조를 가지고 있으며(그림 3) 이런 리플구조는 강한 바람에 의해 형성되는 승화에 의해 생성된다(Bintanja *et al.*, 2001). 리플구조의 마루는 가장 강한 바람의 방향과 직각을 이루며 파고는 $2 \sim 10 \text{ cm}$, 파장은 $5 \sim 24 \text{ cm}$ 로 다양하다(Weller, 1968; Mellor and Swithinbank, 1989; Bintanja *et al.*, 2001). 평균 파고는 계절별로 차이가 있으며 여름에 파고가 더 높아지는데, 이는 여름철에 골 부분이 마루에 비해 더 많이 승화되기 때문으로 알려져 있다(Bintanja *et al.*, 2001). 반면, 여름철 온도가 용융 온도에 이르게 되면 리플구조의 꼭대기 부분이 녹아 평탄해지고 골 부분이 채워지게 된다(Sinisalo and Moore, 2010).

대부분의 블루아이스 표면에서는 먼지 또는 테프라 띠가 발견되며(그림 4), 보통 빙하 흐름 방향에 수직으로 나타난다(Bintanja, 1999). 그러나 알란 힐과 아마토 산맥의 블루아이스에서 발견되는 먼지 띠는 어떤 경우 180°정도 뒤틀려 있는 것도 있다(Koerberl, 1990).

Koerberl (1990)은 남극 블루아이스의 먼지 띠가 대부분 화산 기원이며 남극 대륙과 아 남극 지역의 신생대 화산활동과 관계가 있음을 발견했다. 화산 분출에 의해 남극 대륙에 대량의 화산재가 광범위하게 눈 위에 떨어지게 되고, 그 눈들이 계속 쌓여 얼음이 되어 현재의 블루아이스 지역으로 이동되어진 것으로 설명하였다. 이런 테프라 층은 얼음층과 동시대에 형성된 것으로 블루아이스의 연대 추정에 좋은 정보를 제공한다. 블루아이스 표면의 먼지 층은 화산재 이외에도 다음과 같은 기원이 있다 1) 빙하의 움직임에 의해 형성된 빙하 바닥의 기저암의 잔해. 일반적으로 이런 암석들은 주변의 모래인으로 쌓여 있어 블루아이스 내에서 띠를 이루고 있기가 어려울

수 있다. 2) 미세운석(micrometeorites). 운석에서 떨어져 나온 구체(spherules) 형태의 우주입자. 이것들은 돔 후지(Dome Fuji)와 같은 동남극 중앙부에서 상당량의 분진 형태로 발견되었으며(Nakamura et al., 1999), 이들 빙하가 흘러서 형성되는 아마토 산맥 부근의 블루아이스 지대에서 발견될 가능성이 높다 3) 바람에 의해 운반된 대륙 및 해양 먼지와 에어로졸. 대표적인 것으로는 화산활동과 무관해 보이는 드론닝 모우드 랜드의 블루아이스에서 발견되는 먼지 띠(Koerberl 1990).

크라이요코나이트 홀(Cryoconite holl)은 고도 2,000 m 이하의 낮은 지대에 있는 블루아이스 표면에서 관찰되며, 부분적인 용융에 의해 생성된다(Bintanja, 1999). 즉, 블루아이스 위에 있는 검은 색의 먼지 입자나 돌이 태양 복사열을 많이 흡수하여 주변 얼음을 녹이면서 차츰 가라앉게 된다. 가라앉은 돌 위의 녹은 물이 다시 얼게 되면 주변의 얼음과는 다른 기포가 없는 맑은 얼음 형태를 보이게 된다. 크라이요



Fig. 2. Map of distribution of ice sheet (grey), ice shelves (dark grey) and blue ice areas (blue) in Antarctica and geographical locations referred to in the text. Map from Quantarctica Database, Norwegian Polar Institute.

코나이트 홀의 깊이는 수십cm이다(Bintanja, 1999).

3. 블루아이스 지역의 분류

Takahashi *et al.* (1992)는 블루아이스 지역을 지리적 환경과 얼음 흐름 특성에 따라 네 가지 유형으로 분류했다(그림 5). 이 블루아이스의 지형적 특성에 따른 분류는 Bintanja (1999)에 잘 정리되어 설명되었다.

- 1) 유형 I: 가장 일반적인 블루아이스 형태이며 주변에 솟아있는 산이 장벽이 되어 눈이 쓸려오는 것을 막아 블루아이스 지역을 형성하게 된다. 이러한 형태의 블루아이스 지역의 길이는 산 높이의 약 50-100 배 정도라고 한다(Takahashi *et al.*, 1992).
- 2) 유형 II: 이 유형의 블루아이스는 계곡 빙하(valley



Fig. 3. The rippled surface of the blue ice area in Tarn Flat, Victoria Land, Antarctica.



Fig. 4. Tephra and ice sampling on the blue ice, Elephant Moraine, Antarctica, during 2016 summer season (photo by Lee, J.I., KOPRI).

glacier)에서 만들어진다. 계곡 빙하의 경사면을 따라 하강하는 활강류의 풍속이 빨라지면서 표면을 침식하여 눈을 날려 보내게 되고 내부 얼음을 노출시킨다.

- 3) 유형 III: 솟아있는 산이 없는 상당히 가파른 경사면에 형성된 블루아이스이다. 경사면의 각도가 높아질수록 활강류의 풍속이 세어져 유형 II에서와 같이 내부 얼음을 노출하게 된다.
- 4) 유형 IV: 빙하 분지의 가장 하부에 형성된 블루아이스로 가속된 활강류에 의해 표면 눈이 제거되어 형성된 블루아이스이다.

블루아이스의 유동 체계에 따라 개방형과 폐쇄형으로 구분하기도 한다(Grinsted *et al.*, 2003; 그림 6). 개방형 블루아이스에서는 빙하의 흐름이 산, 누나탁 또는 하부 기반암에 영향을 받지 않아 오래된 얼음 층이 표면에 나타나지 않는다. 노출된 등시선의 각도가 폐쇄형에서 보다 작다. 반면, 폐쇄형은 산이 빙하의 흐름을 막는 역할을 하고 하부 얼음 층이 산의 경사면을 따라 올라오면서 오래된 얼음이 표면에 나타나게 되고 산에 가까운 곳에 보다 더 오래된 얼음이 나타난다(그림 6). 아마토 산맥의 블루아이스는 남극 대륙에서 가장 큰 개방형 블루아이스이고, 스카펜

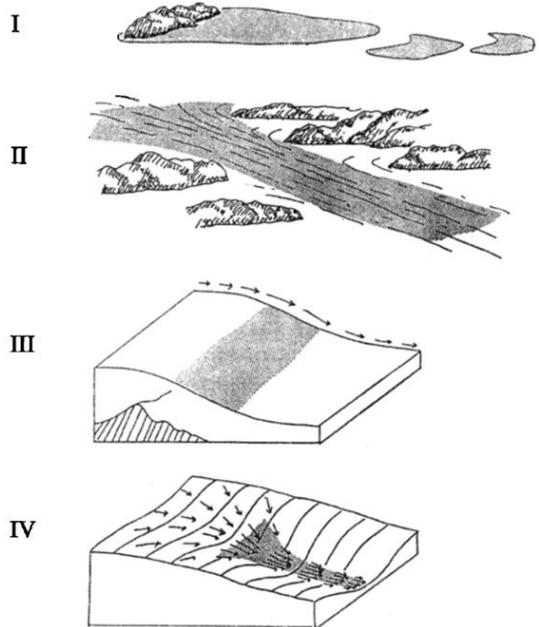


Fig. 5. Schematic illustration of four type of blue ice areas (from Takahashi *et al.*, 1992).

베르그보텐(Scharffenbergbotnen) 블루아이스는 폐쇄형 블루아이스이다(Sinisalo and Moore, 2010).

4. 블루아이스 형성과정

블루아이스의 형성 과정은 Bintaja (1999)에 의해 잘 설명되어 있다. 블루아이스 지역의 형성 순서는 그림 7에 개략적으로 예시되어있다. 빙하기에서 간빙기로 전환되는 시기와 같은 빙하가 감소하는 기간에 다음의 4단계를 거쳐 블루아이스가 형성된다.

- 1) 빙하의 두께가 충분히 두꺼워 하부에 있는 산이 아주 깊은 곳에 있어 표면에 영향을 미치지 못하는 단계
- 2) 빙하의 두께가 얇아지면서 얼음의 흐름은 빙하 하부의 산에 의해 영향을 받고, 하부 지형에 영향을 받은 얼음 표면의 경사가 가파르게 된다. 비탈면의 경사가 급해짐에 따라 활강풍이 증가하여 표면의 눈이 제거되어 아래의 얼음이 노출되게 된다(블루아이스 유형 중 III형).
- 3) 산꼭대기 부분이 얼음 표면 위에 나타나고, 얼음의 흐름을 막게된다. 산의 하부 경사 쪽의 얼음 표면이 낮아지고 블루아이스 지역은 눈의 침식과 승화가 활발해져서 더 넓어지게 된다(블루아이스 유형 중 I형).
- 4) 얼음이 더 낮아져 산이 얼음 위로 완전히 솟아 나오게 되고 산마루 쪽에서는 난기류가 크게

증가한다. 이로 인해 점차 승화 속도가 빨라지고 눈의 침식이 증가하여 블루아이스 표면은 더 낮아지고 넓어지게 된다.

5. 연대측정

블루아이스는 길고 복잡한 이동 과정을 거쳐 깊은 곳에 있던 얼음이 표면에 노출되었기 때문에 정확한 생성연대를 알아내기가 쉽지 않다. 그러나 블루아이스를 고기후 연구에 활용하기 위해서는 정확한 연대를 알고 있어야 하며, 이를 위한 다양한 노력들이 계속되고 있다. 현재까지 다음과 같은 다양한 연대 측정법이 활용되고 있다.

5.1 운석의 낙하연대(terrestrial ages)

블루아이스에서 발견되는 운석의 낙하연대로부터 얼음의 나이를 유추할 수 있다. 우주기원 방사성 핵종을 이용하여 측정된 남극 운석의 낙하연대는 최대 2백만 년 이전이고(Scherer *et al.*, 1997; Welten *et al.*, 2000), 대부분은 50만 년 이내이다(Welten *et al.*, 2000).

블루아이스에서 발견된 대부분의 운석은 블루아이스를 형성하기 이전 지역의 눈 위에 떨어져 현재의 위치로 이동한 것으로 추정된다. 눈 위에 떨어진 운석은 눈과 함께 깊은 곳에서 얼음 속에 갇히게 되고 중력에 의해 흐르다가 블루아이스가 형성되는 지

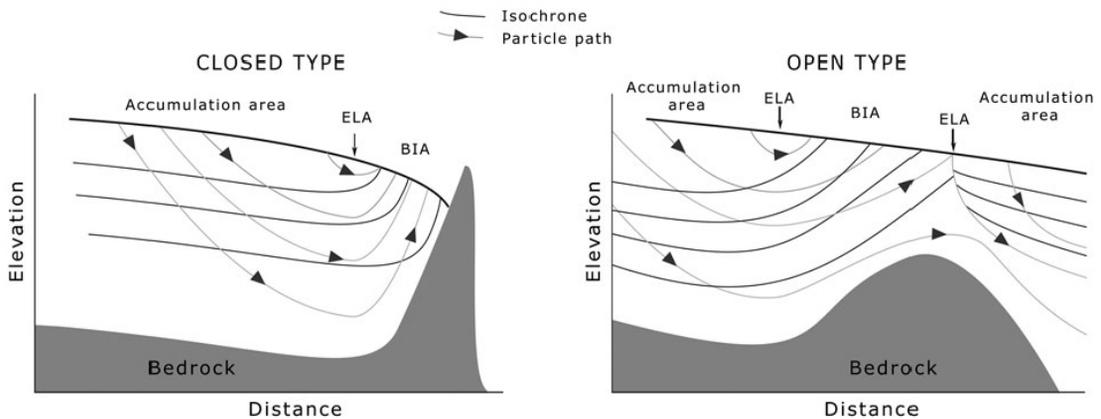


Fig. 6. A sketch of ice flow in a closed type and in an open type blue ice (from Sinisalo *et al.*, 2010). The flow direction is from left to right. Equilibrium line (ELA) separates the snow covered accumulation area from the ablation area. The isochrones that represent individual annual layers come up to the surface of the blue ice eventually resulting in near-vertical layering in a closed blue ice.

역에서 빙하 흐름에 따라 표면으로 올라오고 주위의 얼음이 증발되고 운석은 남게 된다. 따라서 운석이 발견된 얼음의 연령은 운석의 낙하연대와 같거나 더 젊은 연령이 된다. 그러나 운석이 바람에 의해 하류 쪽으로 이동하게 된다면 얼음의 연령은 운석보다 더 오래되었을 수도 있다.

운석 낙하연대를 이용한 연대 측정의 오차는 최소 3만 년이다(Welten *et al.*, 2000). 주된 오차의 원인은 과거의 얼음 흐름이 현재와 달라 빙하의 흐름 과정을 정확히 복원하기 힘들기 때문이다. Goldstein *et al.* (2004)는 2백만 년 전에 떨어진 운석이 발견된 알란 힐 블루아이스 지역에서 약 3만 년 전에 떨어진 운석이 함께 발견되는 것을 확인하고 블루아이스 지역의 얼음의 흐름과 축적이 보다 복잡하고 여러 단계로 이루어 질 수 있음을 설명하였다. 드물게는 운석이 블루아이스 지역에 직접 떨어지는 경우가 있다(Huss, 1990). 이 경우에는 운석이 얼음 속에 묻힌 적이 없기 때문에 운석의 낙하연대가 얼음의 최소연령이 된다.

블루아이스에서 운석이 항상 발견되는 것이 아니고, 빙하의 흐름 변화의 복잡성을 고려할 때 운석의

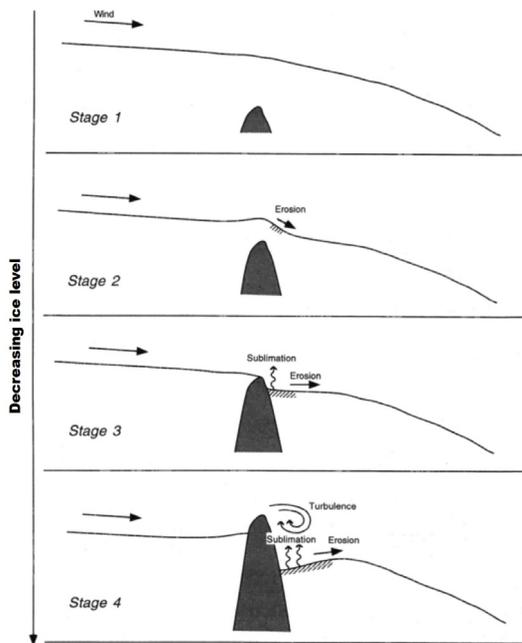


Fig. 7. Illustration of the formation of blue ice areas (hatched areas) during periods of decreasing ice thickness (from Bintanja, 1999).

낙하연대는 얼음 연령 측정의 2차 적인 자료로 활용되어야 하며, 블루아이스 지역의 빙하 흐름체계가 잘 연구되어 있다면 더 신뢰성 있는 자료로 사용될 수 있다.

5.2 ^{14}C 가스 연대측정

Van Roijen은 Fireman and Norris (1982)가 개발한 측정방법을 개선하여 얼음 속의 공기 중에서 ^{14}C 농도를 측정하여 얼음 연대를 측정하는 방법을 개발했다(Van Roijen *et al.*, 1994; Van Roijen, 1996). 이 방법에 따르면 ^{14}C 값의 깊이에 따른 프로파일로 측정하고 현장에서 발생하는 ^{14}C 값으로 보정하여 탄소연대로 변환하게 된다. 방사성 탄소 연대는 방사성 탄소 보정 곡선을 사용하여 실제 연령으로 변환된다(Reimer *et al.*, 2004). 초기에 측정된 블루아이스의 ^{14}C 연대는 수천 년에 이르는 큰 오차를 가지고 있었지만(Van Roijen, 1996), 이후 측정 방법 개선을 통해 오차 범위를 ± 400 년으로 감소시켰다(Van der Kemp *et al.*, 2002). 이 분석법을 위해서는 수 킬로그램의 얼음 시료가 필요하며, 이론적으로 최소 0.5 m 길이의 연속적인 빙하코어가 필요하다. 이 방법은 하나의 연령만 알려주며, 연속적인 연령 프로파일을 제공하지 않는다.

5.3 ^{14}C 미립자 연대측정

Jenk *et al.* (2007)은 빙하코어 시료에서 탄소질 입자를 추출하는 기술을 개발했다. 이 방법에서는 약 1~5 kg의 얼음 시료 당 몇 마이크로그램의 탄소가 있으면 연대측정이 가능하다. 원소 탄소에서 유기탄소를 분리하여 가속기 질량분석기에서 ^{14}C 을 분석한다. 알프스 산악지대에서 시추된 빙하코어에서 지난 500년 동안 약 2~10%의 오차 이내로 연대측정에 성공하였다(Jenk *et al.*, 2006). 이 분석법은 현재 많은 문제점을 안고 있는 빙하코어의 연대측정에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

5.4 ^{81}Kr 연대 측정

Buizert *et al.* (2014)은 크립톤(Kr) 동위원소 비를 이용한 얼음 연대 측정법을 개발하였다. 크립톤은 대기 중에 약 1 ppm의 농도로 존재하는 불활성기체이며, 반감기가 다른 2개의 방사성 동위원소(^{81}Kr ($t_{1/2} = 2.29 \times 10^5$ y) 및 ^{85}Kr ($t_{1/2} = 10.76$ y))로 구성

되어 있다. 이중 ^{85}Kr 은 핵실험 또는 핵발전 과정에서 생성되는 것이고, 자연에 존재하는 것은 ^{81}Kr 이다. ^{81}Kr 은 긴 반감기를 가지고 있어 5만년~150만년 사이의 연령 측정에 적합하다.

크립톤 동위원소 연대측정은 다음의 이유로 오래된 빙하코어 연대 측정에 유용하다 1) 크립톤은 화학적으로 안정하여 긴 시간동안에도 변질되지 않는다 2) 대기 중의 잔류 시간이 길기 때문에 잘 혼합된다 3) 얼음에 포함된 공기를 대상으로 하기 때문에 대부분의 얼음에 적용할 수 있다. 4) 개별 얼음 시료에 적용할 수 있어 얼음 층서에 구애 받지 않는다 5) ^{14}C 과 달리 기포 내에서 자체 생성되는 우주 방사선의 영향을 받지 않는다.

크립톤 동위원소 분석은 성분 함량이 적어 수백 kg의 얼음 시료가 필요하다는 제약이 있었지만, 최근에는 원자포획미량분석법(Atom Trap Trace Analysis)이 개발되어 적은 시료로도 분석이 가능하게 되어 40~80 kg의 얼음 시료로도 분석이 가능하게 되었다.

5.5 테프라 층 연대측정

블루아이스 내의 테프라 층을 대상으로 방사성 동위원소 연대가 측정되었다. 대표적으로 알란 힐(Fireman, 1986; Goldstein *et al.*, 2004), 야마토 산맥(Nishiizumi *et al.*, 1979), 마운트 몰튼(Wilch *et al.*, 1999; Dunbar *et al.*, 2008) 지역에서 연대측정이 실시되었다. 또한, 화산재를 구성하는 입자의 크기 분석을 통해 기원지까지의 거리에 대한 연구도 진행되었다(Nishio *et al.*, 1984; Dunbar *et al.*, 2008). 그러나 블루아이스 얼음 층 내에 존재하는 테프라 층은 부단구조(Boudinage)를 보이는 등 연속성이 좋지 않고 심하게 교란되어 있어 추적하기가 쉽지 않은 단점이 있다.

5.6 산소와 수소 동위 원소 비를 이용한 연대 추정

얼음과 눈의 주 구성성분인 산소와 수소의 동위원소 비로부터 과거의 온도 정보를 얻을 있으며, 빙하기와 간빙기의 구분이 가능하다(Petit *et al.*, 1999; EPICA Community members, 2006). 따라서 블루아이스의 산소와 수소 동위원소 값으로부터 간빙기 또는 빙하기 중 어떤 시기에 생성된 것인지 간단히 알 수 있다. 그러나 서로 다른 시기의 수소와 산소 동위원소를 비교하기 위해서는 눈이 퇴적될 때의 고도

를 고려하여 동위원소 비를 보정해야 한다 (Sinisalo *et al.*, 2007). 이런 제약으로 인해 산소와 수소 안정 동위원소는 빙하기와 간빙기의 구분 정도에만 국한되어 사용할 수 있으며 정확한 해석을 위해서는 얼음 흐름 복원과 과거의 지표면 고도 변화에 대한 추가 정보가 필요하다.

5.7 지형정보를 통한 유추

빙하의 표면에서 녹아 운반되어 퇴적된 빙하퇴적물(supraglacial moraine)의 구조로부터 블루아이스의 연대를 추정할 수 있다. Hättstrand and Johansen (2005)은 스카펜베르그보텐 블루아이스 주변의 모레인이 지난 최대 빙하기(LGM) 기간 동안에 형성된 것임을 확인하였다. 또한 현재까지 이 빙하퇴적물이 남아 있는 것은 이 지역이 삭감이 일어나는 중심이며, 블루아이스가 LGM 때 생성된 것으로 해석했다. 주변의 누나탁 경사면에 있는 모레인은 LGM 때의 블루아이스의 표면 고도가 지금보다 높았음을 지시하며, 노두에선 과거의 빙하의 흐름을 확인하였다. 이와 유사하게 블루아이스 지역의 빙하퇴적물을 통해 과거의 빙하흐름, 지표면 고도, 블루아이스의 존재와 확장 등의 정보를 얻을 수 있다(Sinisalo and Moore, 2010).

5.8 빙하 흐름 모델링

앞서 언급한 연대측정법은 한 지점의 연대만을 제시하지만 빙하 흐름 모델링에 의한 연대는 블루아이스의 연속적인 연령 정보를 제공하며, 적어도 블루아이스의 한 개의 라인에서 연속된 연대 정보를 알 수 있다. 대상 지역에 대한 3차원적인 정보를 알 수 있으면 완전한 빙하 흐름 모델을 구성할 수 있지만, 대부분의 경우에는 제한된 정보를 갖게 되므로 3차원 모델 보다는 하나의 단일 흐름 방향에 대한 모델을 실시하는 것이 더 효율적일 수 있다(Sinisalo *et al.*, 2010).

블루아이스에서의 빙하 흐름 모델링은 블루아이스에서 발견되는 운석을 설명하기 위하여 시도되었다. Nasure and Hashimoto (1982)는 Nye (1963)의 연속 방정식을 기반으로 야마토 산맥의 누나탁 상류에 위치한 블루아이스에 대한 간단한 흐름 모델을 만들었다. Azuma *et al.* (1985)은 주변의 다른 누나탁 부근의 블루아이스에 대해 보다 정교한 모델을 만들었고 이와 유사한 방법으로 Whillams and Cassidy

(1983)는 알란 힐의 블루아이스에 대한 모델을 만들었다. Grinsted *et al.* (2003)는 흐르는 방향에서의 표면 속도, 질량 균형, 얼음 두께 정보를 이용한 부피 보존 모델을 사용하여 깊이에 따른 얼음의 유동성과 등시성을 수치화하여 고기후 연구에 적합한 모델을 제안하였다.

6. 향후 연구 방안

6.1 한국의 남극 운석 연구 거점으로서의 블루아이스

우리나라에서 남극의 블루아이스에 대한 관심은 2006년 남극 패트리엇 힐 주변의 블루아이스 지역에서 운석탐사를 시작하면서다(Lee, 2009). 그 후 여러 차례에 걸쳐 동남극 프론티어 마운틴 블루아이스 지역과 엘리펀트 모레인 블루아이스 지역에서 운석탐사를 실시하여 현재까지 약 1,000점의 운석을 회수하였다.

그러나 아직까지 이 지역에서 운석의 회수 이외의 연구는 수행되지 못하고 있다. 앞으로 발견되는 운석의 낙하시기를 알려주는 연대측정과 현 지점에 집적되기까지의 과정을 알기 위한 블루아이스의 흐름 방향, 속도, 얼음의 삭박량 등의 다양한 관측 자료를 통한 얼음 흐름에 대한 입체적 이해가 필요할 것으로 보이며, 향후 꾸준한 운석탐사에 수반되어 이러한 노력들이 이루어지길 기대한다.

6.2 오래된 얼음 시료 획득을 위한 블루아이스 연구

최근 남극 빙하연구에서 최대의 관심사 중의 하나는 남극 빙원에서 1백만 년 이상된 얼음을 채집하여 백만 년을 전후해서 빙하기-간빙기의 주기가 4만 년에서 10만 년으로 바뀐 원인을 규명하는 것이다(Elderfield *et al.*, 2012). 이를 위하여 여러 나라들은 최대 백 오십만 년까지의 빙하를 시추하기 위해 빙하코어 국제 연구자 모임(IPICS, International Partnerships in Ice Core Sciences)을 중심으로 많은 노력을 하고 있고, 중국은 남극에서 가장 고지대인 돔A 지역에 기지를 건설하고 빙하코어를 시추하고 있으며, 일본, 유럽연합, 미국은 별도의 심부 빙하시추를 위해 일련의 준비 작업을 하고 있다. 우리나라도 극지연구소를 중심으로 심부빙하시추를 위한 장기계획을 수립하고 관련된 인프라 구축과 기술개발을 착수하였다.

3~4천 m 깊이까지 시추하여야 하는 심부빙하시

추는 극한 환경에 적합한 로지스틱 지원과 이와 결합된 최첨단 기술력이 있어야 하며, 많은 비용과 시간이 필요하다. 이에 반해, 오랜 기간 상부의 눈과 얼음이 삭박되어 노출되어 있는 블루아이스에서는 비교적 손쉽게 표면 또는 수백 m 깊이의 천부빙하시추를 통해 수십만년에서 최대 수백만년까지의 얼음 시료를 얻을 수 있다. 최근 알란 힐 블루아이스 지역에서 시추된 126 m의 빙하코어에서 백만년 이상된 것으로 추정되는 얼음 시료에 대한 대기 조성 분석 결과가 발표되기도 하였다(Higgins *et al.*, 2015). 또한 블루아이스를 이용한 고기후 연구에서는 심부빙하시추에 비해 훨씬 많은 시료를 얻을 수 있는 장점이 있다.

6.3 테프라, 얼음 유동 모델 등 종합적인 연구 필요

블루아이스를 이용한 고기후 연구에서 최대의 난제는 정확한 연대측정이다. 앞서 언급한 바와 같이 블루아이스를 대상으로 정확한 연령정보를 얻기 위한 다양한 방법들이 시도되고 있으며, 분석 방법의 발달에 따라 연대 측정의 정확도가 많이 개선되고 있다.

우리나라는 여러 블루아이스 지역에서 운석을 회수하고 있다. 2014년 남극 장보고과학기지가 건설된 이후에 인근의 엘리펀트 모레인 지역에서 집중적인 운석탐사가 이루어지고 있으며, 이 지역 블루아이스에 대한 기초적인 연구가 수행되고 있다(Jang *et al.*, 2017). 향후 이 지역에서 다음과 같은 연구가 깊이있게 진행된다면 블루아이스에서 수십만 년 또는 최대 백만 년 이상된 얼음 시료를 채집하고 이에 대한 고기후 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

- 1) 운석의 낙하시기 연대 측정
- 2) 블루아이스의 이동 방향, 속도, 얼음의 삭박 속도 등 물리관측
- 3) 아이스 레이더, 지표면 투과 레이더(GPR) 등의 내부 구조 탐사
- 4) 블루아이스 지층에 산출되는 테프라 층에 대한 연대측정
- 5) 블루아이스 흐름에 대한 3차원 모델링
- 6) 블루아이스 얼음에 대한 동위원소 연대 측정

이러한 일련의 연구를 위해서는 운석탐사, 지구 물리 탐사, 테프라 층에 대한 지질학적인 연구, 얼음 층에 대한 다양한 기후변화 프록시 측정, 얼음 내 가스 성분 농도 분석과 동위원소 측정 등을 결합한 중

합적인 연구가 수행되어야 한다.

7. 결 론

남극 빙원에서 오랜 기간 식박되어 형성된 블루아이스는 수십만 년에서 백만 년 이상된 얼음 시료가 표면에 노출되어 있어 많은 비용과 시간이 소요되는 심부빙하시추에 비해 손쉽게 오래된 얼음 시료를 확보하여 고기후 연구에 활용할 수 있다. 그러나 블루아이스 시료를 고기후 연구에 활용하기 위해서는 얼음 시료에 대한 정확한 연대 정보를 알아야 한다. 최근 분석기술의 발달에 따라 적은 량의 시료로도 동위원소 측정이 가능함에 따라 얼음시료에 대한 절대연령 측정이 시도되고 있다. 또한 블루아이스의 주변 지형, 빙하 흐름 모델링 등의 종합적인 정보를 통해 연속적인 연대정보를 추정할 수 있다. 우리나라는 2006년 이후 남극 블루아이스 지역에서 현재까지 1,000여점의 운석을 채집하였으나 블루아이스의 형성 과정에 대한 연구는 수행되지 않았다. 2014년 남극 장보고과학기지가 건설됨에 따라 주변의 블루아이스에 대한 다양한 연구가 수행될 것으로 기대된다. 향후 블루아이스 지역에서 운석, 지질, 지구물리, 빙하, 대기 등의 종합적인 연구가 수행되어 블루아이스의 생성과 거동을 이해하고 정확한 생성 연대를 알게 된다면 수십만 년 이상된 오래된 얼음 시료를 획득하여 고기후 연구에 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 극지연구소의 창의연구사업(PE15350)과 주요사업(PE17040)의 지원을 받아 수행된 연구사업이다.

REFERENCES

- Azuma, N., Nakawo, M., Higashi, A. and Nishio, F., 1985, Flow pattern near Massif A in the Yamato bare ice field estimated from the structures and the mechanical properties of a shallow ice core. *Memoirs National Institute of Polar Research Special Issue*, 39, 173-183.
- Bintanja, R., 1999, On the glaciological, meteorological, and climatological significance of Antarctic blue ice areas. *Reviews of Geophysics*, 37, 337-359.
- Bintanja, R. and Reijmer, C.H., 2001, Meteorological conditions over Antarctic blue ice areas and their influence on the local surface mass balance. *Journal of Glaciology*, 47, 37-50.
- Bintanja, R., Reijmer, C.H. and Hulscher, S.J.M.H., 2001, Detailed observations of the rippled surface of Antarctic blue ice areas. *Journal of Glaciology*, 47, 387-396.
- Bintanja, R. and van den Broeke, M.R., 1995a, The climate sensitivity of Antarctic blue ice areas. *Annals of Glaciology*, 21, 157-191.
- Bintanja, R. and van den Broeke, M.R., 1995b, The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 902-926.
- Boutron, C.F., 1995, Historical reconstruction of the earth's past atmospheric environment from Greenland and Antarctic snow and ice cores. *Environmental Reviews*, 3, 1-28.
- Buizert, C., Baggenstos, D., Jiang, W., Purtschert, R., Petrenko, V.V., Lu, Z.T., Muller, P., Kuhl, T., Lee, J., Severinghaus, J.P. and Brook, E.J., 2014, Radiometric ⁸¹Kr dating identifies 120,000-year-old ice at Taylor Glacier, Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 6876-6881.
- Cassidy, W.A., Olsen, E. and Yanai, K., 1977, Antarctica: A Deep Freeze Storehouse for Meteorites. *Science*, 198, 727-731.
- Crary, A.P. and Wilson, C.R., 1961, Formation of "Blue" Glacier Ice by Horizontal Compressive Forces. *Journal of Glaciology*, 3, 1045-1050.
- Custer, S.E., 2006, Eemian records of $\delta^{18}\text{O}_{\text{am}}$ and CH_4 correlated to the Vostok EGT4 timescale from the Moulton Blue Ice Field, West Antarctica. A senior thesis in Geosciences, The Pennsylvania State University, USA.
- Dunbar, N.W., McIntosh, W.C. and Esser, R.P., 2008, Physical setting and tephrochronology of the summit caldera ice record at Mt. Moulton, West Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 796-812.
- Elderfield, H., Ferretti, P., Greaves, M., Crowhurst, S., McCave, I.N., Hodell, D. and Piotrowski, A.M., 2012, Evolution of ocean temperature and ice volume through the Mid-Pleistocene Climate Transition. *Science*, 337, 704-709.
- EPICA Community Members, 2006, One-to-one hemispheric coupling of millennial polar climate variability during the last glacial. *Nature*, 444, 195-198.
- Faure, G. and Buchanan, D., 1991, Ablation rates of the ice fields in the vicinity of the Allan Hills, Victoria Land, Antarctica. *Contributions to Antarctic research II, Antarctic Research Series*, 153, 19-31.
- Fireman, E.L., 1986, Uranium-series dating of Allan Hills ice. *Journal of Geophysical Research*, 91, D539-D544.
- Fireman, E.L. and Norris, T.L., 1982, Ages and composition of gas trapped in Allan Hills and Byrd core ice. *Earth*

- and Planetary Science Letters, 60, 339-350.
- Fischer, H., Severinghaus, J., Brook, E., Wolff, E., Albert, M., Alemany, O., Arthern, R., Bentley, C., Blankenship, D., Chappellaz, J., Creyts, T., Dahl-Jensen, D., Dinn, M., Frezzotti, M., Fujita, S., Gallee, H., Hindmarsh, R., Hudspeth, D., Jugie, G., Kawamura, K., Lipenkov, V., Miller, H., Mulvaney, R., Pattyn, F., Ritz, C., Schwander, J., Steinhage, D., van Ommen, T. and Wilhelms, F., 2013, Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS "Oldest Ice" ice core. *Climate of the Past*, 9, 2489-2505.
- Folco, L., Welten, K.C., Jull, A.J.T., Nishiizumi, K. and Zeoli, A., 2006, Meteorites constrain the age of Antarctic ice at the Frontier Mountain blue ice field (northern Victoria Land). *Earth and Planetary Science Letters*, 248, 209-216.
- Gjaever, J., 1954, *The White Desert. The Official Account of the Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition.* Chatto & Windus, London.
- Goldstein, S.J., Murrell, M.T., Nishiizumi, K. and Nunn, A.J., 2004, Uranium-series chronology and cosmogenic ^{10}Be - ^{36}Cl record of Antarctic ice. *Chemical geology*, 204, 125-143.
- Grinsted, A., Moore, J.C., Spikes, V. and Sinisalo, A., 2003, Dating Antarctic Blue Ice Areas using a novel ice flow model. *Geophysical Research Letters*, 30, doi:10.1029/2003GL017957.
- Hättestrand, C. and Johansen, N., 2005, Supraglacial moraines in Scharffenbergbotnen, Heimefrontfjella, Dronning Maud Land, Antarctica - significance for reconstructing former blue ice areas. *Antarctic Science*, 17, 225-236.
- Higgins, J.A., Kurbatov, A.V., Spaulding, N.E., Brook, E., Introne, D.S., Chimiak, L.M., Yan, Y., Mayewski, P.A. and Bender, M.L., 2015, Atmospheric composition 1 million years ago from blue ice in the Allan Hills, Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 6887-6891.
- Hui, F., Ci, T., Cheng, X., Scambos, T.A., Liu, Y., Zhang, Y., Chi, Z., Huang, H., Wang, X., Wang, F., Zha, C., Jin, Z. and Wang, K., 2014, Mapping blue-ice areas in Antarctica using ETM plus and MODIS data. *Annals of Glaciology*, 55, 129-137.
- Huss, G.R., 1990, Meteorite infall as a function of mass: Implications for the accumulation of meteorites on Antarctic ice. *Meteoritics*, 25, 41-56.
- Jang, Y., Han, Y., Ryu, Y., Moon, J., Ju, H.-T., Yang, J.-W., Lee, H.-G., Jun, S.J., Lee, J., Hur, S.D. and Ahn, J., 2017, A preliminary study for blue ice in Victoria Land, East Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 567-580 (in Korean with English abstract).
- Jenk, T.M., Szidat, S., Schwikowski, M., Gaeggeler, H.W., Brütsch, S., Wacker, L., Synal, H.A. and Saurer, M., 2006, Radiocarbon analysis in an Alpine ice core: record of anthropogenic and biogenic contributions to carbonaceous aerosols in the past (1650-1940). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 5381-5390.
- Jenk, T.M., Szidat, S., Schwikowski, M., Gaeggeler, H.W., Wacker, L., Synal, H.A. and Saurer, M., 2007, Microgram level radiocarbon (^{14}C) determination on carbonaceous particles in ice. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 259, 518-525.
- Jouzel, J., 2013, A brief history of ice core science over the last 50 yr. *Climate of the Past*, 9, 2525-2547.
- Koerberl, C., 1990, Dust bands in blue ice fields in Antarctica and their relationship to meteorites and ice. In: Cassidy, W.A. and Whillans, I.M. (eds.), *Workshop on Antarctic Meteorite Stranding Surfaces.* Lunar and Planetary Institute Technical Report, 90, 03, 70-73.
- Lee, J.I., 2009, 2006-2008 Korea Expedition for Antarctic Meteorites (KOREAMET). *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 621-637 (in Korean with English abstract).
- Mellor, M. and Swithinbank, C., 1989, Airfields on Antarctic glacier ice. *CRRELL Report*, 89-21.
- Moore, J.C., Nishio, F., Fujita, S., Narita, H., Pasteur, E., Grinsted, A., Sinisalo, A. and Maeno, N., 2006, Interpreting ancient ice in a shallow ice core from the South Yamato (Antarctica) blue ice area using flow modeling and compositional matching to deep ice cores. *Journal of Geophysical Research*, 111, D16302, doi:10.1029/2005JD006343.
- Nakamura, T., Imae, N. and Nakai, I., 1999, Antarctic micrometeorites collected at the Dome Fuji Station. *Antarctic Meteorite Research*, 12, 183-198.
- Naruse, R. and Hashimoto, M., 1982, Internal flow lines in the ice sheet upstream of the Yamato Mountains, East Antarctica. *Memoirs National Institute of Polar Research Special Issue*, 24, 201-203.
- Nishiizumi, K., Arnold, L.R., Elmore, D., Ferraro, R.D., Gove, H.E., Finkel, R.C., Beukens, R.P., Chang, K.H. and Kilius, L.R., 1979, Measurements of ^{36}Cl in Antarctic meteorites and Antarctic ice using a Van de Graaff accelerator. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 285-292.
- Nishiizumi, K., Elmore, D. and Kubik, P.W., 1989, Update on terrestrial ages of Antarctic meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 93, 299-313.
- Nishio, F., Katsushima, T., Ohmae, H., Ishikawa, M. and Takahashi, S., 1984, Dirt layers and atmospheric transportation of volcanic glass in the bare ice areas near the Yamato Mountains in Queen Maud Land and the Allan Hills in Victoria Land, Antarctica. *Memoirs National Institute of Polar Research Special Issue*, 34, 160-173.
- Nye, J.F., 1963, Correction factor for accumulation meas-

- ured by the thickness of the annual layers in an ice sheet. *Journal of Glaciology*, 4, 785-788.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delayque, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999, Climate and Atmospheric History of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature*, 399, 429-436.
- Popp, T., Sowers, T., Dunbar, N., McIntosh, W. and White, J.W.C., 2004, Radioisotopically dated climate record spanning the last interglacial in ice from Mount Moulton, West Antarctica. AGU Fall Meeting, American Geophysical Union.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Bronk Ramsey, C., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E., 2004, INTCAL04 Terrestrial radiocarbon age calibration 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1029-1058.
- Scherer, P., Schultz, L., Neupert, U., Knauer, M., Neumann, S., Leya, I., Michel, R., Mokus, J., Lipschutz, M.E., Metzler, K., Suter, M. and Kubik, P.W., 1997, Allan Hills 88019: an Antarctic H chondrite with a very long terrestrial age. *Meteoritics and Planetary Science*, 32, 769-773.
- Sinisalo, A., Grinsted, A., Moore, J.C., Meijer, H.A.J., Martma, T. and van de Wal, R.S.W., 2007, Inferences from stable water isotopes on the Holocene evolution of Scharffenbergbotnen blue ice area, East Antarctica. *Journal of Glaciology*, 53, 427-434.
- Sinisalo, A. and Moore, J.C., 2010, Antarctic blue ice areas-towards extracting palaeoclimate information. *Antarctic Science*, 22, 99-115.
- Schultz, L., Annestad, J.O. and Delisle, G., 1990, Ice movement and mass balance at the Allan Hills Ice field. *Antarctic Journal of the United States*, 25, 94-95.
- Schytt, V., 1961, *Glaciology II*. E. Blue ice fields, moraine features and glacier fluctuations. Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949-52, Scientific results, vol. IVE, 183-204.
- Takahashi, S., Endoh, T., Azuma, N. and Meshida, S., 1992, Bare ice fields developed in the inland part of Antarctica. Proceedings NIPR Symposium on Polar Meteorology and Glaciology, 5, 128-139.
- Van den Broeke, M.R. and Bintanja, R., 1995, The interaction of katabatic wind and the formation of blue ice areas in East Antarctica. *Journal of Glaciology*, 41, 395-407.
- Van der Kemp, W.J.M., Alderliesten, C., van der Borg, K., de Jong, A.F.M., Lamers, R.A.N., Oerlemans, J., Thomassen, M. and van de Wal, R.S.W., 2002, In situ produced ^{14}C by cosmic ray muons in ablating Antarctic ice. *Tellus*, 54B, 186-192.
- Van Roijen, J.J., 1996, Determination of ages and specific mass balances from ^{14}C measurements on Antarctic surface ice. Ph.D. thesis, Faculty of Physics and Astronomy, Utrecht University.
- Van Roijen, J.J., Bintanja, R., van der Borg, K., van den Broeke, M.R., de Jong, A.F.M. and Oerlemans, J., 1994, Dry extraction of $^{14}\text{CO}_2$ and ^{14}CO from Antarctic ice. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 92, 331-334.
- Watanabe, O., Jouzel, J., Johnsen, S., Parrenin, F., Shoji, H. and Yoshida, N., 2003, Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature*, 422, 509-512.
- Weller, G.E., 1968, The heat budget and heat transfer processes in Antarctic plateau ice and sea ice. ANARE Scientific Reports, Series A, 4, *Glaciology*, 102.
- Welten, K.C., Nishiizumi, K. and Caffee, M.W., 2000, Update on terrestrial ages of Antarctic meteorites (No. UCRL-JC-137138). Lawrence Livermore National Lab., CA (US).
- Whillans, I.M. and Cassidy, W.A., 1983, Catch a falling star; meteorites and old ice. *Science*, 222, 55-57.
- Wilch, T.I., McIntosh, W.C. and Dunbar, N.W., 1999, Late quaternary volcanic activity in Marie Byrd Land: Potential $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dated time horizons in West Antarctic ice and marine cores. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1563-1580.
- Winther, J.G., Jespersen, M.N. and Liston, G.E., 2001, Blue ice areas in Antarctic derived from NOAA AVHRR satellite data. *Journal of Glaciology*, 47, 325-334.
- Yoshida, M., Ando, H., Omoto, K., Naruse, R. and Ageta, Y., 1971, Discovery of meteorites near Yamato Mountains, East Antarctica. *Antarctic Record*, 39, 62-65.

Received : July 31, 2017

Revised : August 30, 2017

Accepted : August 31, 2017